

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ НАГРУЗОК НА МЕХАНИЗМ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫЛЕТА СТРЕЛЫ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПОРТАЛЬНОГО КРАНА

Изменение вылета стрелы у порталных кранов является рабочей операцией, выполняется с грузом номинальной грузоподъемности и является практически постоянной составляющей каждого рабочего цикла крана.

Осуществляется изменение вылета стрелы механизмом изменения вылета (МИВ), тяговым звеном которого является зубчатая рейка [1].

Привод МИВ электрический, мощность электродвигателя и характер работы МИВ зависят от большого числа знакопеременных факторов, действующих в различных комбинациях и с разными числовыми значениями. Существенное влияние на мощность привода оказывает масса и качество синтеза шарнирно-сочлененного стрелового устройства (ШСУ).

На рис. 1 представлена динамическая модель ШСУ, на которой обозначены действующие силы.

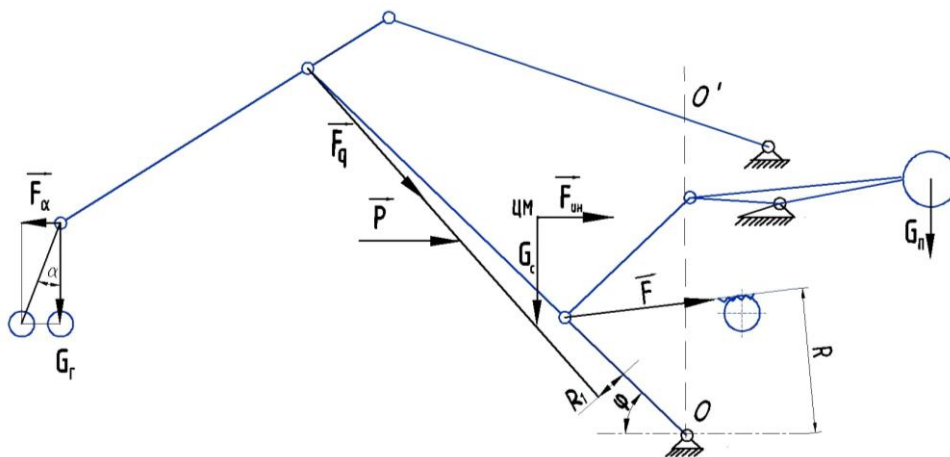


Рис. 1. Динамическая модель шарнирно-сочлененного стрелового устройства (ШСУ): G_r – вес груза; G_n – вес противовеса; G_c – вес стреловой системы; P – сила давления ветра; \overline{F}_q – сила от неуравновешенного грузового момента; \overline{F}_α – сила от веса груза при отклонении канатов от вертикали; $\overline{F}_{ин}$ – сила от сил инерции при движении стрелового устройства, \overline{F} – суммарная сила в рейке.

Векторы сил $\overline{F}_q, \overline{F}_\alpha, \overline{F}_{ин}$ могут менять направление и числовые значения в зависимости от вылета стрелы (угла φ), угла α (отклонения канатов от вертикали), направления движения стрелы при изменении вылета (от $max \rightarrow min$ или от $min \rightarrow max$) и направления ветра.

При установившемся движении каждая из этих сил при текущем значении угла φ будет создавать момент относительно оси OO' .

Суммарный момент будет равен:

$$\overline{M} = \overline{M}_q + \overline{M}_{nc} + \overline{M}_e + \overline{M}_\alpha + \overline{M}_{ин}, \quad (1)$$

где \overline{M}_q – грузовой неуравновешенный момент, создаваемый силой \overline{F}_q ;

\overline{M}_{nc} – неуравновешенный момент стреловой системы, создаваемый взаимодействием сил G_c и G_n ;

\overline{M}_e – момент от ветровой нагрузки, создаваемый равнодействующей силой давления ветра P ;

\overline{M}_α – момент от действия силы G_c , возникающий от веса груза при отклонении канатов от вертикали;

$\overline{M}_{ин}$ – момент от силы инерции $F_{ин}$ при движении стреловой системы.

Положительные значения \overline{M} возникают при увеличении вылета, отрицательные – при уменьшении вылета.

Для преодоления суммарного момента \overline{M} механизмом изменения вылета необходимо в его рейке создать соответствующую силу \overline{F} :

$$\overline{F} = \frac{\overline{M}}{R}, \quad (2)$$

где R – плечо силы \overline{F} в рейке относительно оси OO' .

Так как суммарный момент может иметь различные знаки, то и сила в рейке \overline{F} будет знакопеременной. Она будет вызывать растяжение рейки, либо её сжатие.

При установившемся движении рейка механизма изменения вылета будет нагружена знакопеременной силой, величина которой, в общем виде, является функцией скорости движения рейки, вылета стреловой системы, ускорений, давления ветра, веса груза.

Суммарная сила в рейке складывается из единичных нагрузок:

$$\overline{F} = \overline{F}_q + \overline{F}_{nc} + \overline{F}_e + \overline{F}_\alpha + \overline{F}_{ин}, \quad (3)$$

где F_e – сила от давления ветра на стреловую систему;

F_{nc} – сила от неуравновешенного стрелового устройства.

Так как величина и знак суммарной силы в рейке изменяется в зависимости от угла наклона стрелы φ (вылета), то весь диапазон вылетов разделяется на участки, и для каждого значения вылета выполняется расчет сил, действующих на рейку, и суммарной силы в рейке.

Расчеты суммарной силы в рейке выполняются для трех случаев нагружения крана [2]:

Случай I – номинальные нагрузки рабочего состояния при работе в нормальных условиях с грузом номинального веса, отклонение канатов от вертикали $5,5^\circ$, сила давления ветра – $0,6 P_e$.

Случай II – максимальные нагрузки рабочего состояния, сила ветра рабочего состояния P_e при максимальном давлении $q = 200$ Па.

Случай III – нагрузки нерабочего состояния при отсутствии груза; максимальное давление ветра нерабочего состояния для данного ветрового района.

Для расчета МИВ [3] необходимо определить значение и знак каждой составляющей нагрузки на зубчатую рейку при всех дискретных значениях угла φ (вылета), а также значение и знак суммарной силы в рейке.

Значения суммарных сил в рейке являются основой для определения мощности привода МИВ и выбора электродвигателя.

В настоящем исследовании поставлена задача анализа генерации суммарной силы в рейке; оценки роли каждой составляющей нагрузки, их взаимного влияния друг на друга и на суммарную силу; определения возможности оптимизации и пути уменьшения суммарной силы в рейке.

Анализ действующих сил был проведен на примере портального крана КПП–16 – 36 – 10,5 грузоподъемностью 16 т при максимальном вылете стрелы; скорость движения рейки МИВ составляет 0,166 м/с для случая нагружения крана II [2].

Значения каждой составляющей нагрузки определялись на вылетах стрелы 8 – 10 – 16 – 22 – 28 – 36 метров с учетом направления ветра и движения стрелы.

Числовые значения сил в рейке от составляющих нагрузок приведены в таблице 1, а графики их изменений – на рисунках 2 – 5.

Так как направление ветра может совпадать с направлением движения стрелы или быть встречным, то анализировались четыре возможных комбинации нагружения рейки МИВ:

- 1) движение от вылета 8м к вылету 36м по ветру (8→36→) – рисунок 2;
- 2) движение от вылета 8м к вылету 36м против ветра (8→36←) – рисунок 3;
- 3) движение от вылета 36м к вылету 8м по ветру (36→8→) – рисунок 4;
- 4) движение от вылета 36м к вылету 8м против ветра (36→8←) – рисунок 5.

Таблица 1

Силы в рейке крана КПП–16 – 36 – 10,5

Сила	Условия нагружения	Значения сил в кН при вылетах стрелы, м					
		8	10	16	22	28	36
\vec{F}_{nc}	При всех движениях	107,49	75,44	18,47	6,68	35,96	98,58
\vec{F}_q		-30,56	-66,27	-39,57	10,40	34,31	-122,10
\vec{F}_{e1}	8→36→36→8←	152,16	149,58	130,81	79,07	95,36	22,74
\vec{F}_{e2}	36→8→8→36←	-152,16	-149,58	-130,81	-79,07	-95,36	-22,74
\vec{F}_{a1}	36→8	133,11	132,62	149,07	175,55	202,27	229,48
\vec{F}_{a2}	8→36	-133,11	-132,62	-149,07	-175,55	-202,27	-229,48
\vec{F}_{un1}	36→8	10,84	11,56	15,73	21,83	24,06	28,74
\vec{F}_{un2}	8→36	-10,84	-11,56	-15,73	-21,83	-24,06	-28,74

Суммарные силы в рейке приведены в таблице 2.

Таблица 2

Суммарные силы в рейке крана КПП–16 – 36 – 10,5

Нагрузки	Условия нагружения	Значения сил в кН при вылетах стрелы, м					
		8	10	16	22	28	36
$\vec{F}_q; \vec{F}_{nc}; \vec{F}_{e1};$ $\vec{F}_{a2}; \vec{F}_{un2}$	8→36→	85,14	14,57	-55,09	-101,23	-60,70	-258,73
$\vec{F}_q; \vec{F}_{nc}; \vec{F}_{e2};$ $\vec{F}_{a2}; \vec{F}_{un2}$	8→36←	-219,18	-284,59	-316,71	-259,37	-251,42	-304,21
$\vec{F}_q; \vec{F}_{nc}; \vec{F}_{e2};$ $\vec{F}_{a1}; \vec{F}_{un1}$	36→8→	68,72	3,77	12,89	135,39	201,24	212,23
$\vec{F}_q; \vec{F}_{nc}; \vec{F}_{e1};$ $\vec{F}_{a1}; \vec{F}_{un1}$	36→8←	373,04	302,04	274,51	293,53	391,96	257,71

В этих комбинациях нагружения будет изменяться знак действующих сил: \vec{F}_e – от давления ветра; \vec{F}_a – от веса груза при отключении канатов; \vec{F}_{un} – от инерции при движении стрелового устройства.

Сила \vec{F}_q от неуравновешенного грузового момента \vec{M}_q на протяжении всего цикла изменения вылета стрелы изменяет значение и знак. Знак её изменения зависит только от характера изменения грузового неуравновешенного момента и не зависит от направления изменения вылета. Характер же неуравновешенного грузового момента зависит от синтеза стреловой системы, её геометрических параметров, соотношения длин звеньев, оптимизации кинематической схемы стреловой системы (СС) и веса груза.

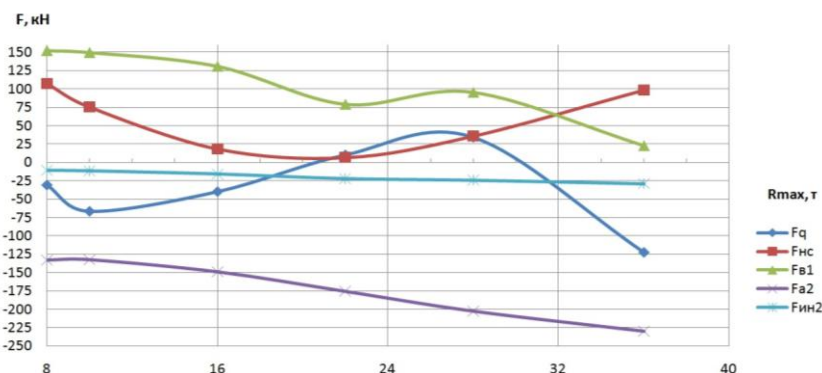


Рис. 2. Графики нагрузок на рейку механизма вылета стрелы для случая 8→36→

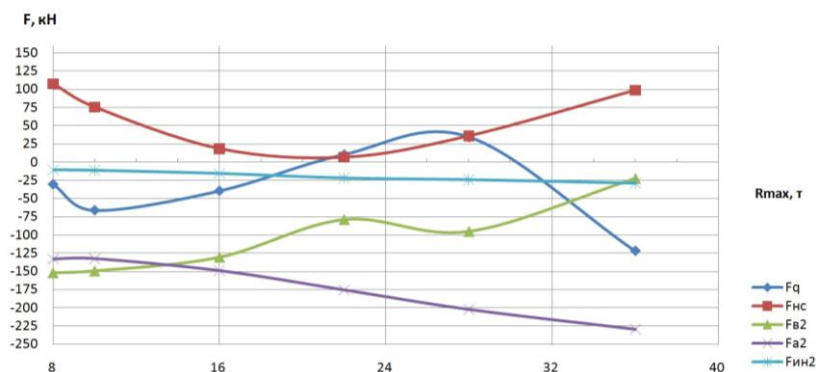


Рис. 3. Графики нагрузок на рейку механизма вылета стрелы для случая 8→36←

Сила \vec{F}_{nc} от неуравновешенного стрелового момента \vec{M}_{nc} на протяжении всего цикла изменения вылета стрелы изменяет значение, может иметь положительный или отрицательный знак. Закон её изменения зависит только от характера изменения неуравновешенного стрелового момента и не зависит от направления изменения вылета. Характер же неуравновешенного стрелового момента зависит от синтеза системы уравновешивания, оптимизации кинематической схемы системы уравновешивания (СУ) и веса противовеса G_n .

Сила \vec{F}_e воздействует на рейку от момента \vec{M}_e , создаваемого равнодействующей силой давления ветра \vec{P} на стреловую систему. Знак \vec{F}_e изменяется в зависимости от сочетания направлений ветра и движения стреловой системы при изменении вылета стрелы. \vec{F}_e будет положительной при движении стрелы 8→36 по ветру и движении 36→8 против ветра; отрицательной – при движении 8→36 против ветра и движении 36→8 по ветру. Значение силы \vec{F}_e изменяется в зависимости от угла наклона стрелы φ и, как показывает анализ, максимально при минимальном вылете стрелы (φ_2), а минимально – при максимальном вылете стрелы (φ_1).

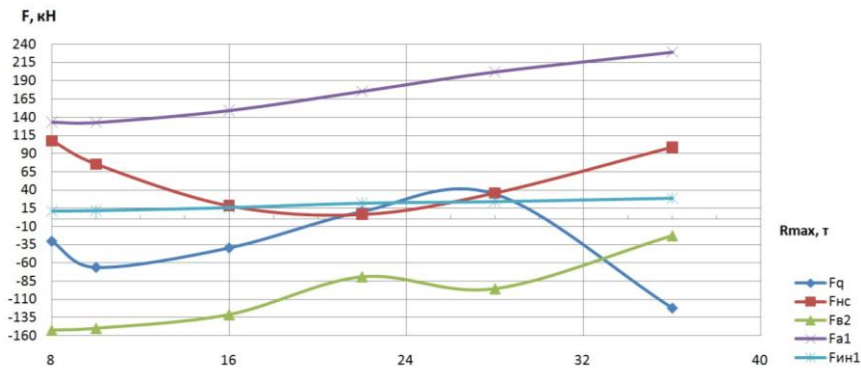


Рис. 4. Графики нагрузок на рейку механизма вылета стрелы для случая 36→8→

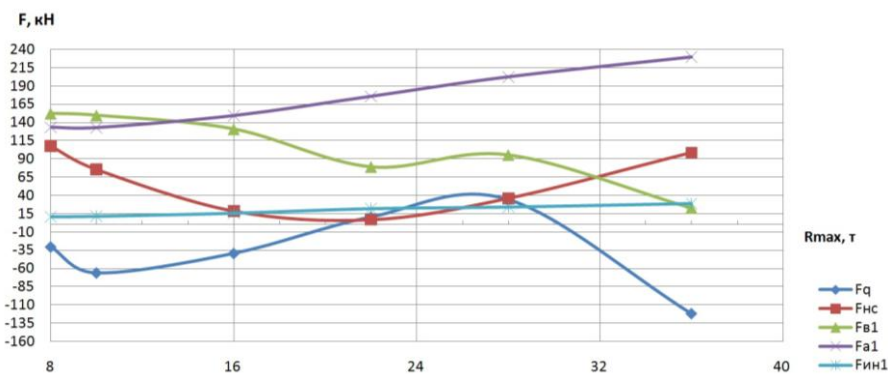


Рис. 5. Графики нагрузок на рейку механизма вылета стрелы для случая 36→8←

Сила \vec{F}_α от веса груза при отклонении канатов от вертикали возникает во время неустановившегося движения при изменении вылета стреловой системы. Канаты с подвешенным грузом отклоняются от вертикали в сторону, обратную направлению движения стрелы при разгоне, и по направлению движения стрелы при торможении. Установлено, что значения силы \vec{F}_α зависят от ускорения движения точки подвеса груза, длины подвеса груза, веса груза G_c и направления движения стреловой системы: при движении 36 → 8 знак будет положительным, при движении 8 → 36 – отрицательным.

Сила $\vec{F}_{ин}$ воздействует на рейку от момента инерции движущихся масс стреловой системы при изменении вылета.

Момент инерции создается силой инерции, действующей в плоскости качания стрелы, приложенной в центре масс СС, и равной:

$$F_{ин} = m \cdot a = \frac{G_c}{g} \cdot \frac{v_g}{t}, \quad (4)$$

где m – масса стреловой системы,
 g – ускорение свободного падения,
 v_g – скорость изменения вылета,
 t – время пуска (торможения).

Учитывая, что у современных перегрузочных порталных кранов скорости изменения вылета не превышают 1 м/с, а вес стреловой системы – 40 – 50 т [4], сила инерции будет:

$$F_{ин} = \frac{50000}{9.81} \cdot \frac{1}{5} = 10200 \text{ Н.}$$

Она не создает больших моментов инерции $\overline{M}_{ин}$ и не приводит к большим нагрузкам на рейку (см. табл. 1, рис. 2 – 5), поэтому $\overline{F}_{ин}$ можно пренебречь.

Выполненный обобщенный анализ нагрузок, действующих на МИВ, позволяет оценить влияние каждой нагрузки, её удельное значение в общей нагрузке, и, что очень важно, учесть взаимное влияние всех действующих нагрузок с учетом их знака и вектора действия на суммарную, результирующую нагрузку, возникающую на рейке механизма изменения вылета.

Анализ позволяет наметить пути снижения нагрузок на рейку механизма изменения вылета и, тем самым, уменьшить мощность привода и энергопотребление портального крана.

Предлагаются следующие направления формирования нагрузок на рейку МИВ с учетом их взаимного влияния и максимально возможного уменьшения.

1) Система уравнивания должна быть спроектирована так, чтобы неуравновешенный стреловой момент $\overline{M}_{нс}$ на минимальном вылете имел отрицательный знак (рис. 6). Значение неуравновешенного момента должно быть минимально.

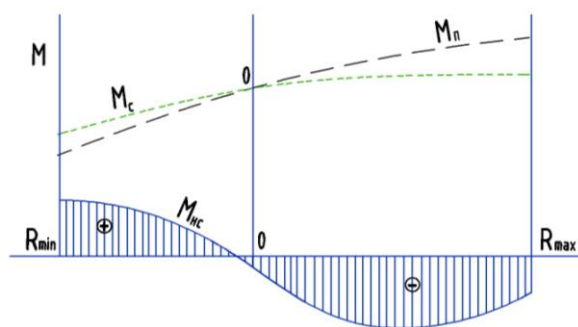


Рис. 6. График моментов $M_c, M_n, M_{нс}$

2) Синтез стреловой системы должен быть выполнен не только с обеспечением минимального отклонения груза от горизонтали при изменении вылета стрелы, но и с обязательным выполнением условия, чтобы неуравновешенный грузовой момент \overline{M}_q на минимальном вылете стрелы имел отрицательный знак, а на максимальном вылете – положительный.

3) За счет такого программируемого характера изменяющихся моментов \overline{M}_q и $\overline{M}_{нс}$ с учетом их взаимного влияния достигается результирующее воздействие на систему минимизированного момента ΣM (рис. 7). Авторами предложен принцип полезного использования взаимного влияния неуравновешенных грузового и стрелового моментов [5].

4) Реализовать требования п.п. 1, 2, 3 возможно с использованием ПК и специальных прикладных автоматизированных программ синтеза и оптимизации стреловой системы портального крана.

5) Должен быть уменьшен момент \overline{M}_α относительно оси качания стрелы вызываемый при разгоне и торможении стреловой системы при изменении вылета силой инерции \overline{F}_α , которая возникает при отклонении канатов от вертикального положения.

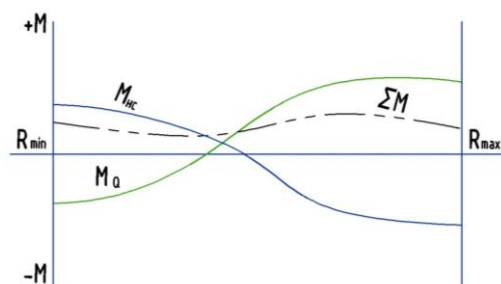


Рис. 7. Графики моментов $M_{nc}, M_0, \Sigma M$

б) Повлиять на момент от ветровой нагрузки M_0 нельзя без уменьшения наветренной площади стреловой системы, что определено конструкцией СС и СУ. Учитывая пульсацию скорости ветра и изменение его направления, нормами расчета кранов [3] регламентировано для определения мощности электродвигателей механизмов принимать среднюю ветровую нагрузку P_{el} , равную $P_{el} = 0,6 P_{e2}$, где P_{e2} – максимальная нагрузка в рабочем состоянии. ГОСТ 1451 – 77 также устанавливает, что ветровая нагрузка, учитываемая при определении мощности приводных двигателей крановых механизмов, не должна превышать 70% от статической составляющей ветровой нагрузки. Это положение также должно быть использовано при определении ветрового момента $\overline{M_0}$ и нагрузки $\overline{F_0}$.

Применив эти положения на рассматриваемом примере portalного крана, получены новые значения сил $\overline{F_q}; \overline{F_{nc}}; \overline{F_0}; \overline{F_{\alpha}}; \overline{F_{ин}}$ (табл. 3) и определена суммарная нагрузка на рейку МИВ (табл. 4) при всех случаях нагружения.

Таблица 3

Силы в рейке крана КПП–16 – 36 – 10,5 после оптимизации

Сила	Условия нагружения	Значения сил в кН при вылетах стрелы, м					
		8	10	16	22	28	36
$\overline{F_q}$	При всех движениях	-100,0	-92,5	-45	7,5	47,5	100,0
$\overline{F_{nc}}$		95,0	75,0	25,0	-12,5	-40,0	-70,0
$\overline{F_{e1}}$	8→36→36→8←	91,3	89,8	78,5	72,0	57,2	13,6
$\overline{F_{e2}}$	36→8→8→36←	-91,3	-89,8	-78,5	-72,0	-57,2	-13,6
$\overline{F_{\alpha 1}}$	36→8	120,0	120,0	118,0	110,0	104,0	100,0
$\overline{F_{\alpha 2}}$	8→36	-120,0	-120,0	-118,0	-110,0	-104,0	-100,0
$\overline{F_{ин1}}$	36→8	10,84	11,56	15,73	21,83	24,1	28,74
$\overline{F_{ин2}}$	8→36	-10,84	-11,56	-15,73	-21,83	-24,1	-28,74

Проверочным расчётом установлено, что значение среднеквадратичной суммарной силы в рейке МИВ до оптимизации нагрузок составляет 101,3 – 313,7 кН. Реализация расчёта нагрузок, действующих на МИВ, выполнялась с использованием принципа взаимного влияния неуравновешенных грузового и стрелового моментов. Это позволило уменьшить значение среднеквадратичной суммарной силы в рейке до 68,3 – 191,8 кН, что даёт снижение мощности МИВ на 15 кВт.

Таблица 4

Суммарные силы в рейке крана КПП-16 – 36 – 10,5 после оптимизации

Нагрузки	Условия нагружения	Значения сил в кН при вылетах стрелы, м					
		8	10	16	22	28	36
$\vec{F}_q; \vec{F}_{nc}; \vec{F}_{e1};$ $\vec{F}_{\alpha 2}; \vec{F}_{un2}$	8→36→	-44,54	-59,26	-75,23	-64,8	-63,4	-85,14
$\vec{F}_q; \vec{F}_{nc}; \vec{F}_{e2};$ $\vec{F}_{\alpha 2}; \vec{F}_{un2}$	8→36←	-227,14	-238,86	-232,23	-208,83	-178,3	-112,34
$\vec{F}_q; \vec{F}_{nc}; \vec{F}_{e2};$ $\vec{F}_{\alpha 1}; \vec{F}_{un1}$	36→8→	34,54	24,26	35,23	54,83	78,4	145,14
$\vec{F}_q; \vec{F}_{nc}; \vec{F}_{e1};$ $\vec{F}_{\alpha 1}; \vec{F}_{un1}$	36→8←	217,14	203,86	192,23	198,83	185,3	172,34

ВЫВОДЫ

1. В работе выполнен анализ генерации суммарной силы в рейке механизма изменения вылета стрелы портального крана; рассмотрена роль каждой составляющей нагрузки, их взаимное влияние друг на друга и на суммарную силу.
2. Впервые в теории проектирования портальных кранов предложен принцип полезного использования взаимного влияния неуравновешенных грузового и стрелового моментов.
3. Определены возможности оптимизации и выполнены расчёты сил в рейке с учётом представленных рекомендаций и требований к синтезу стреловой системы, позволяющих уменьшить суммарную силу в рейке и, тем самым, снизить мощность привода МИБ и энергопотребление крана.

Перечень ссылок

1. *Михеев В.А., Власов В.Т.* Специальные краны / В.А. Михеев, В.Т. Власов. – Мариуполь: ПГТУ, 2004.– 424 с.
2. Справочник по кранам: в 2-х т. Т.1 под общ. ред. *М.М. Гохберга.*– Л.: Машиностроение, 1988.– 536 с.
3. Справочник по кранам: в 2-х т. Т.2 под общ. ред. *М.М. Гохберга.*– Л.: Машиностроение, 1988.– 559 с.
4. *Петухов П.З.* Специальные краны / П.З. Петухов. – Москва: Машиностроение, 1967.– 248 с.
5. *Суглобов В. В.* Шарнирно-сочлененная стреловая система как единая система в аспекте энергопотребления портальных кранов / В.В. Суглобов, В.А. Михеев, Е.В. Ткачук // *Materialy X Mezinarodni vedecko - prakticka konference «Věda a vznik– 2013/2014».* – Praha: Education and Science. – Dil 36, Technické vědy 2014. – S. 53 – 56.

Рецензент: д. т. н, проф. Ищенко А. А.

Статья поступила 24.01.2014